

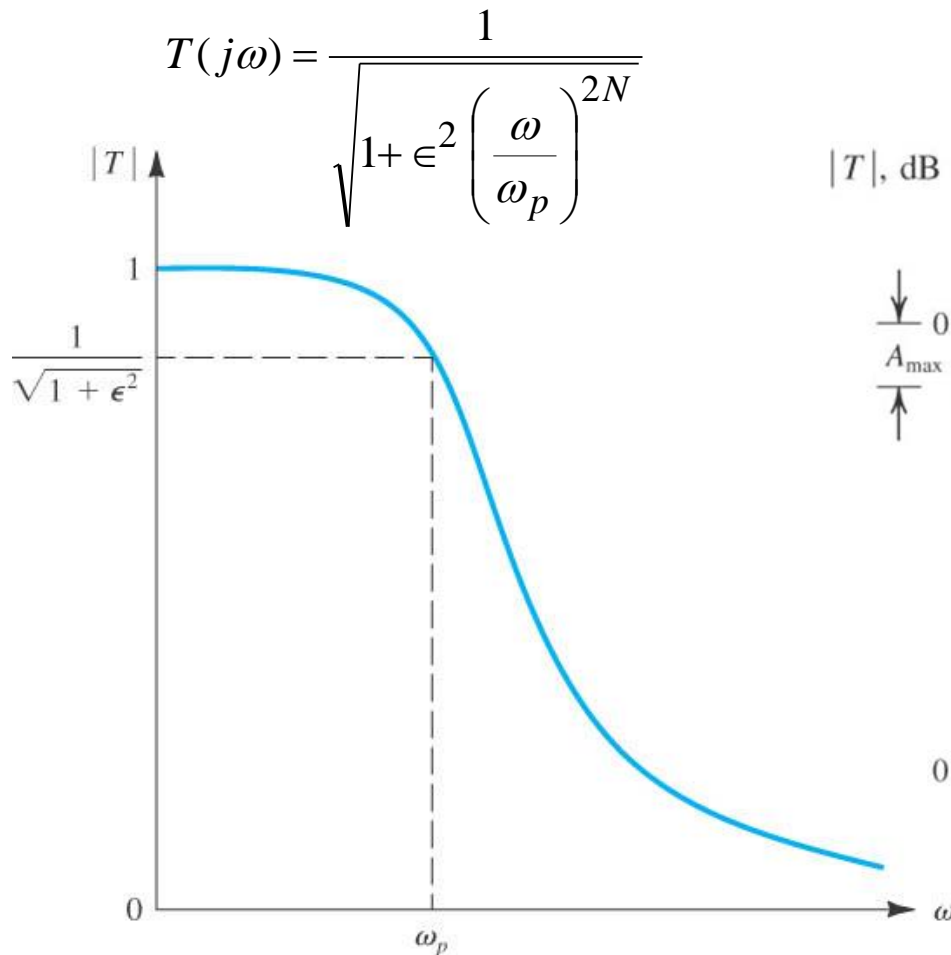
# FILTROS

## FILTROS II

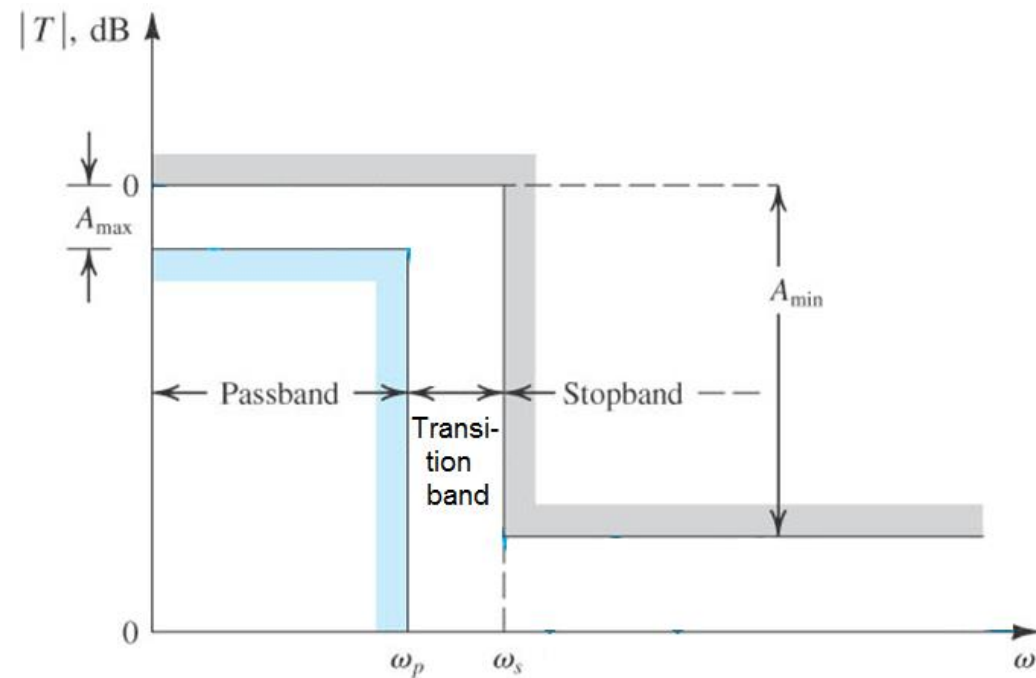
# Filtros

## Filtros Butterworth

Resposta em módulo de um  
Filtro Butterworth - PB

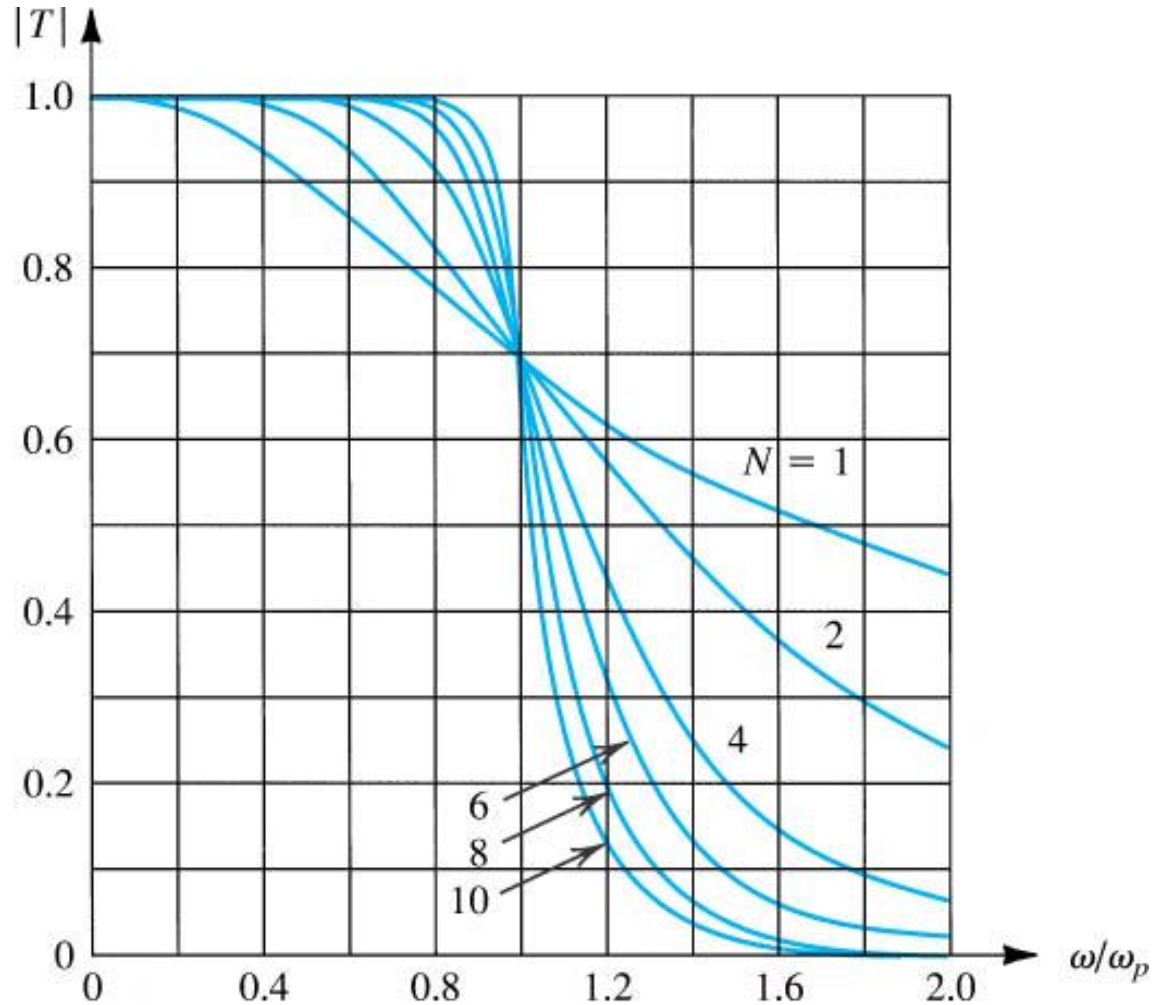


Características de transmissão de  
filtro passa-baixas genérico



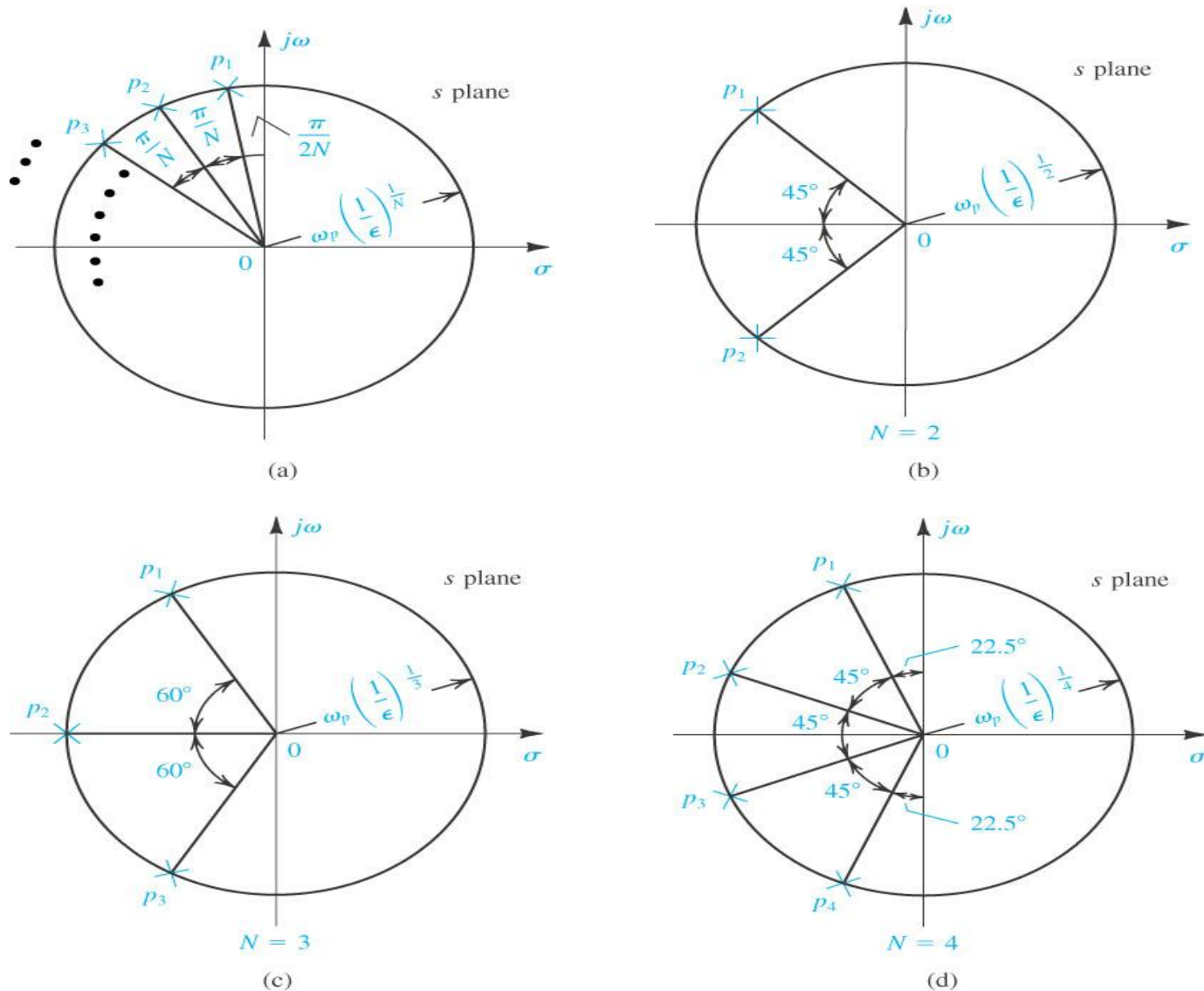
# Filtros

Resposta em módulo para filtros Butterworth PB de várias ordens ( $N$ )



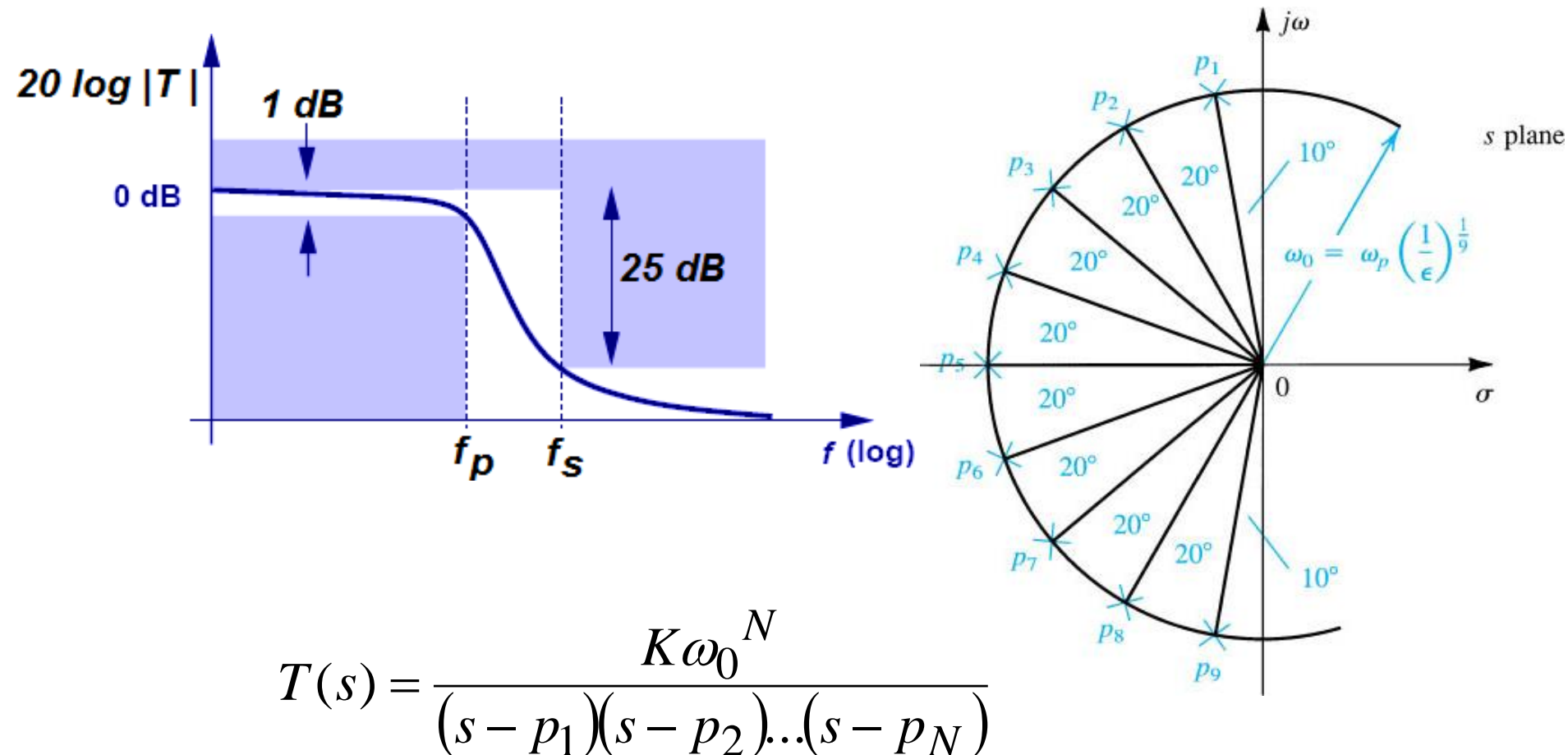
# Filtros

Posição dos pólos para filtros Butterworth de ordem  $N$



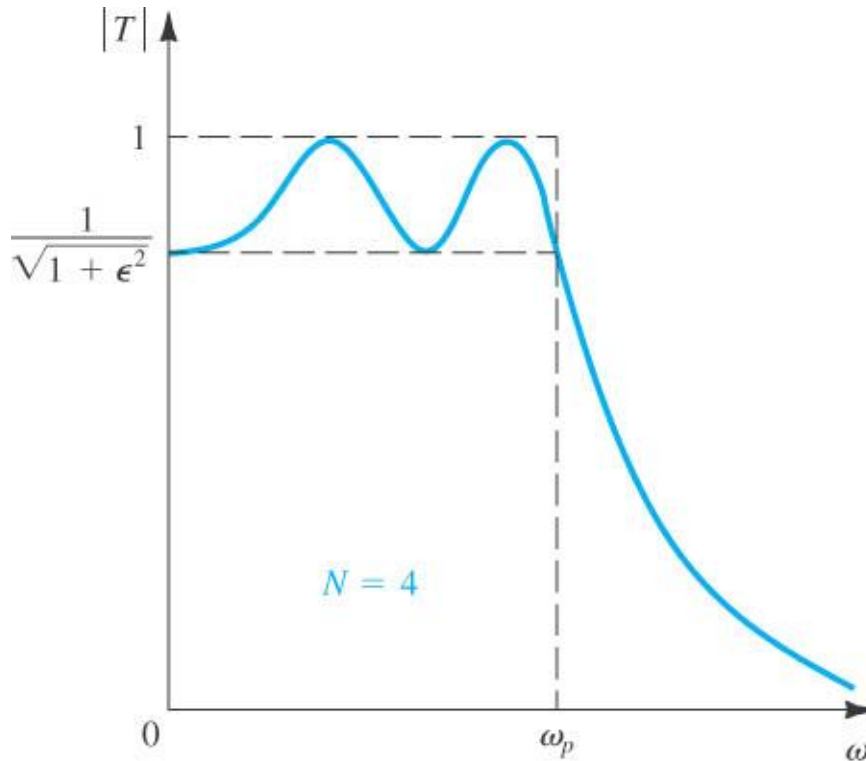
# Filtros

Exemplo 1: Encontre os parâmetros do filtro Butterworth PB que atenda as seguintes especificações:  $f_p = 10$  kHz,  $A_{max} = 1$  dB,  $f_s = 15$  kHz,  $A_{min} = 25$  dB

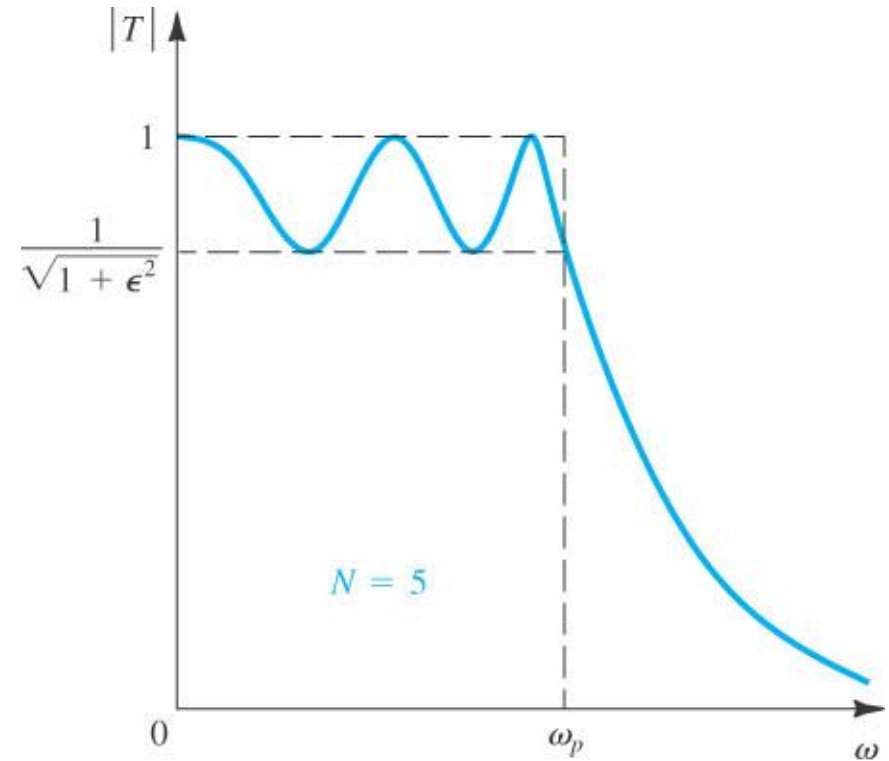


# Filtros

## Característica de transmissão dos Filtros Chebyshev



Filtro de 4ª ordem



Filtro de 5ª ordem

# Filtros

## Filtros Chebyshev

Polinômio de Chebyshev

$$T(j\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \epsilon^2 C_N^2\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)}}$$

$$C_1\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right) = \frac{\omega}{\omega_p}$$

$$C_2\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right) = 2\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^2 - 1$$

$$C_3\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right) = 4\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^3 - 3\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)$$

$$C_{n+1}\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right) = 2\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)C_n - C_{n-1}\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)$$

# Filtros

## Filtros Chebyshev

para  $\omega \leq \omega_p$

$$T(j\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \epsilon^2 \cos^2 \left[ N \cos^{-1} \left( \frac{\omega}{\omega_p} \right) \right]}}$$

para  $\omega \geq \omega_p$

$$T(j\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \epsilon^2 \cosh^2 \left[ N \cosh^{-1} \left( \frac{\omega}{\omega_p} \right) \right]}}$$

quando  $\omega = \omega_p$

$$T(j\omega_p) = \frac{1}{\sqrt{1 + \epsilon^2}}$$

$$A_{\max} = 10 \log(1 + \epsilon^2)$$

$$\epsilon = \sqrt{10^{A_{\max}/10} - 1}$$

$$A(\omega_s) = 10 \log \left[ 1 + \epsilon^2 \cosh^2 \left( N \cosh^{-1} (\omega_s / \omega_p) \right) \right]$$

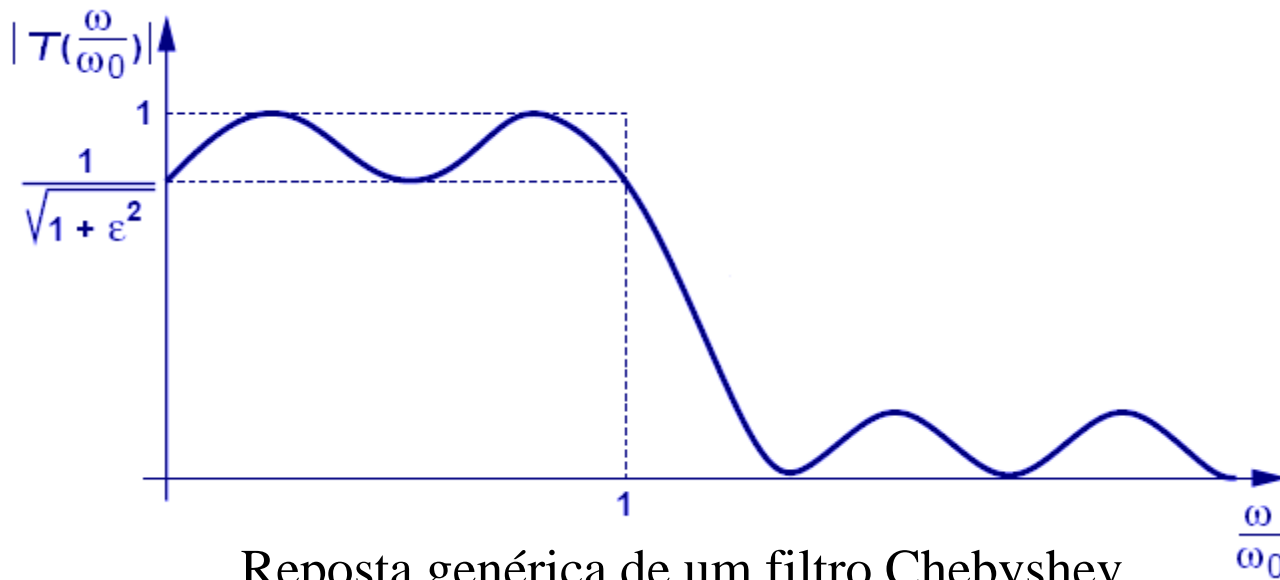


Parâmetros para  
projeto do Filtro  
Chebyshev



# Filtros

Exemplo 2: Um filtro Chebyshev deve ter no máximo 1 dB de ondulação (*ripple*) para uma banda de 5 MHz e uma atenuação de 30 dB em 10 MHz. Determine a ordem do filtro.



## Filtros

Exemplo 3: Encontre os parâmetros do filtro Chebyshev PB que atenda as seguintes especificações:  $f_p = 10$  kHz,  $A_{max} = 1$  dB,  $f_s = 15$  kHz,  $A_{min} = 25$  dB. Compare com o resultado do filtro de Butterworth.

Resposta:

$$\epsilon = 0,5088$$

$$N = 3, A_{min} = 13,4 \text{ dB (não)}$$

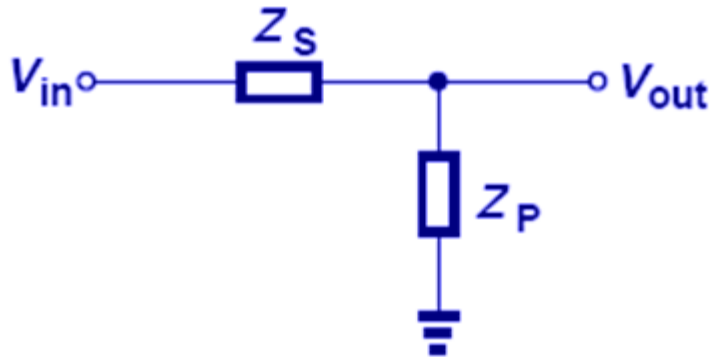
$$N = 4, A_{min} = 21,6 \text{ dB (não)}$$

$$N = 5, A_{min} = 29,9 \text{ dB (OK!)}$$

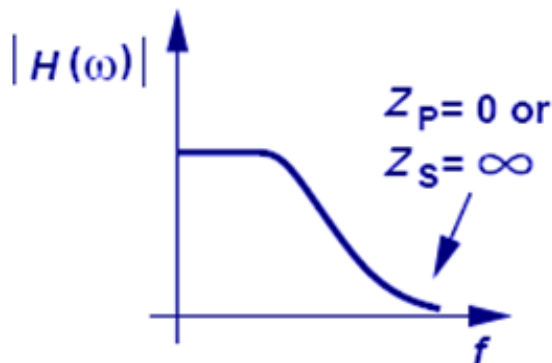
Butterworth  $N = 9$

# Filtros

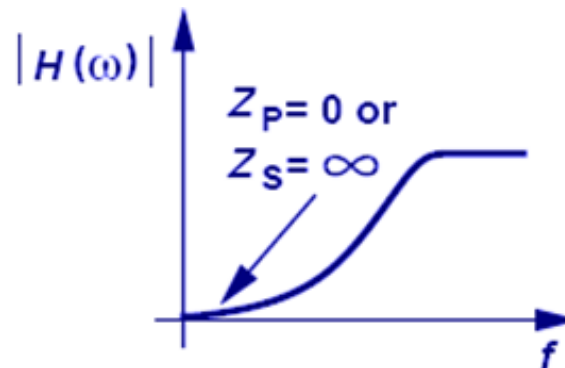
## Síntese de Filtros de 2ª ordem



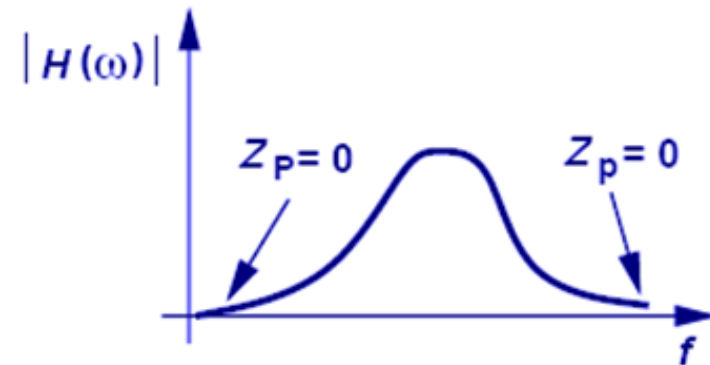
$$\frac{V_{out}}{V_{in}}(s) = \frac{Z_P}{Z_S + Z_P}$$



**PB**



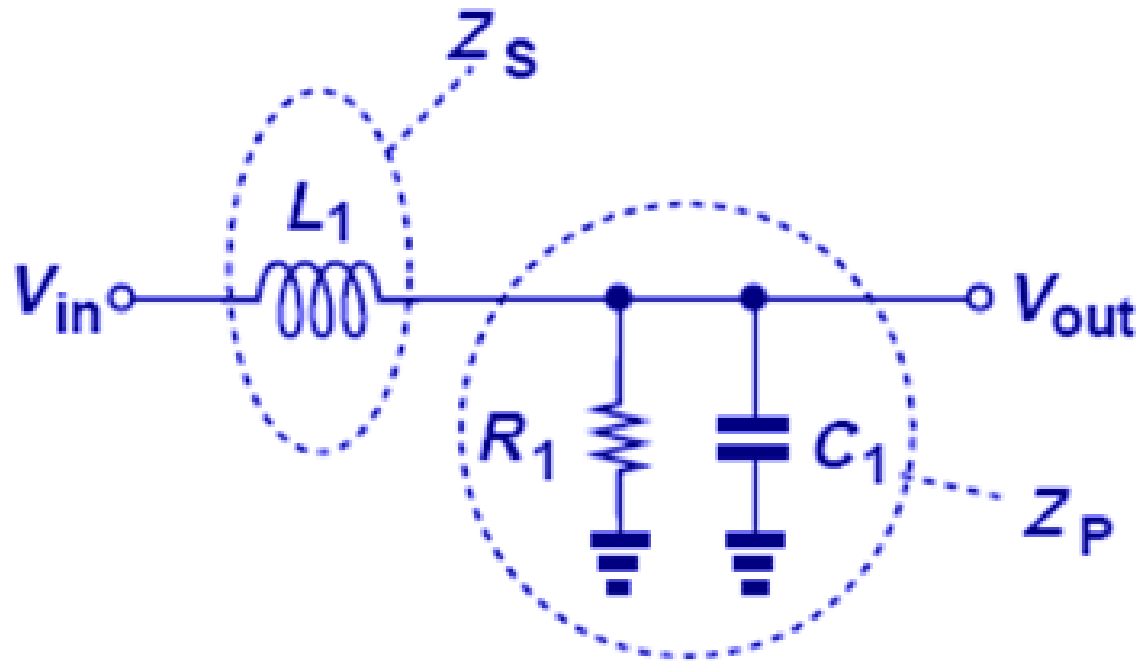
**PA**



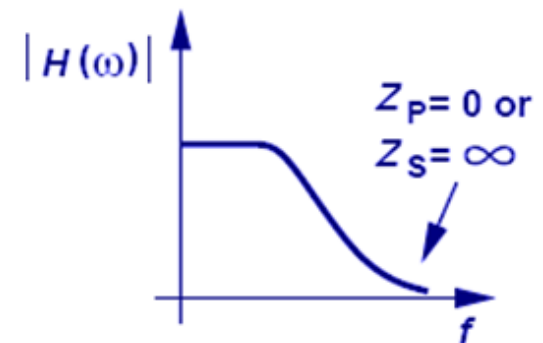
**PF**

# Filtros

Implementação de Filtros Passa-baixas usando divisor de tensão

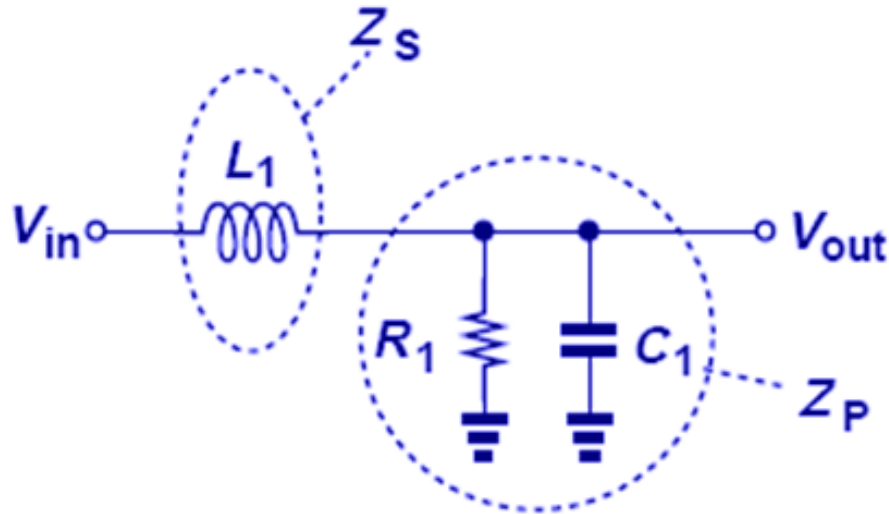


$$\frac{V_{out}}{V_{in}}(s) = \frac{R_1}{R_1 C_1 L_1 s^2 + L_1 s + R_1}$$

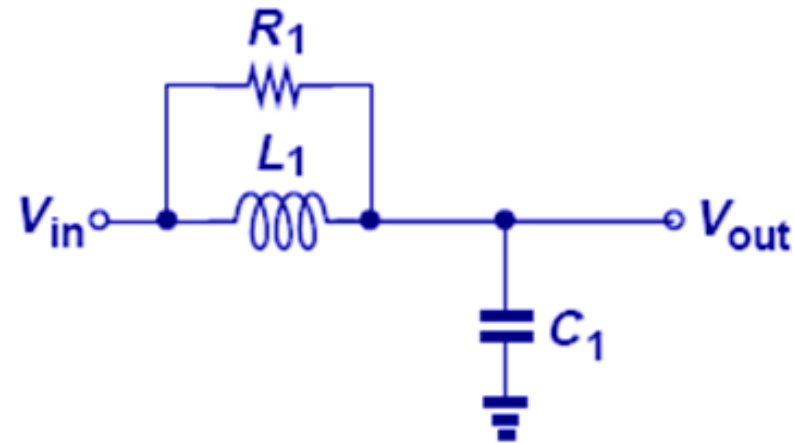


# Filtros

Implementação de Filtros Passa-baixas usando divisor de tensão



**Bom**

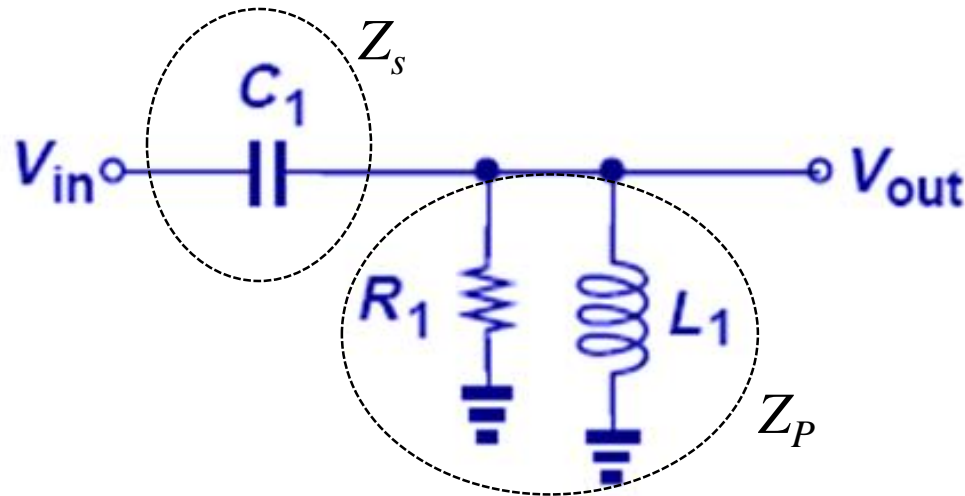


**Ruim**

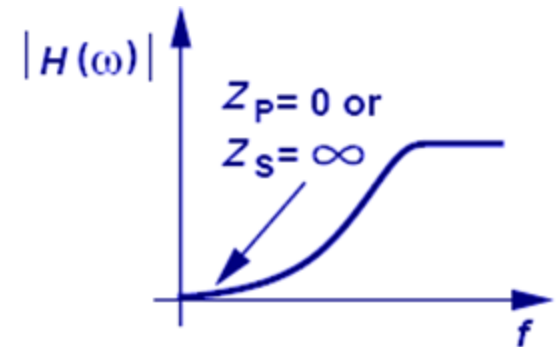
- O circuito da esquerda possui uma queda mais acentuada em alta frequência quando comparado com o circuito da direita

# Filtros

Implementação de Filtros passa-altas usando divisor de tensão

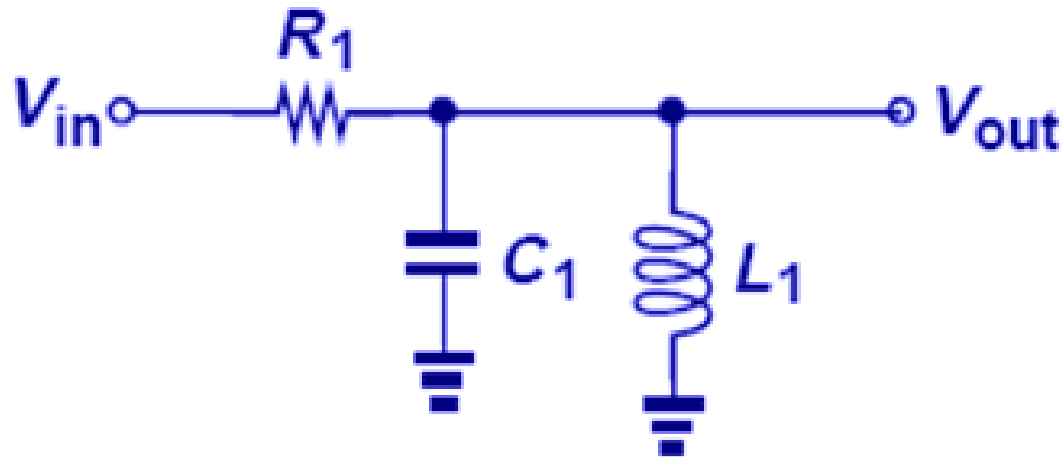


$$\frac{V_{out}}{V_{in}}(s) = \frac{L_1 C_1 R_1 s^2}{R_1 C_1 L_1 s^2 + L_1 s + R_1}$$

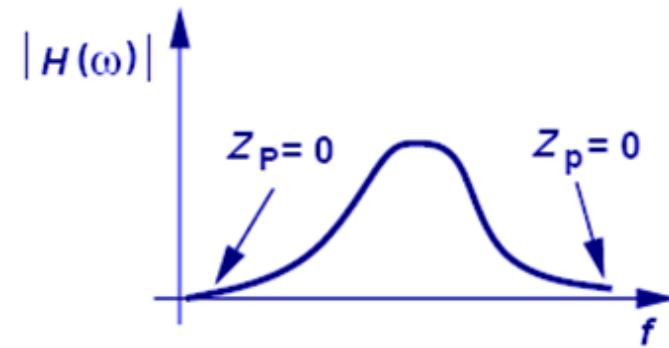


# Filtros

Implementação de Filtros Passa-Faixa usando divisor de tensão

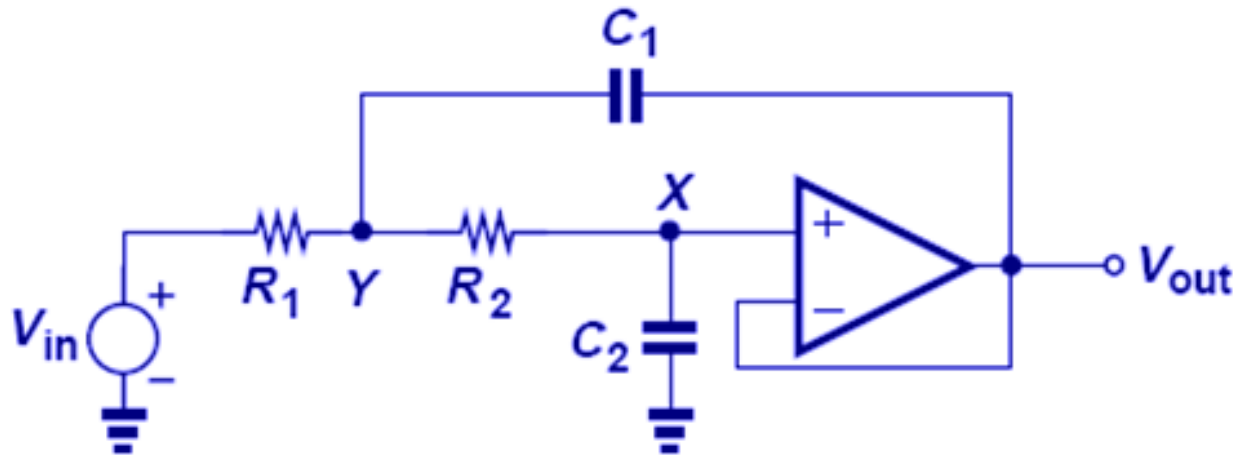


$$\frac{V_{out}}{V_{in}}(s) = \frac{L_1 s^2}{R_1 C_1 L_1 s^2 + L_1 s + R_1}$$



# Filtros

## Implementação de Filtros Ativos



$$\frac{V_{out}}{V_{in}}(s) = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2 s^2 + (R_1 + R_2) C_2 s + 1}$$

$$Q = \frac{1}{R_1 + R_2} \sqrt{R_1 R_2 \frac{C_1}{C_2}}$$

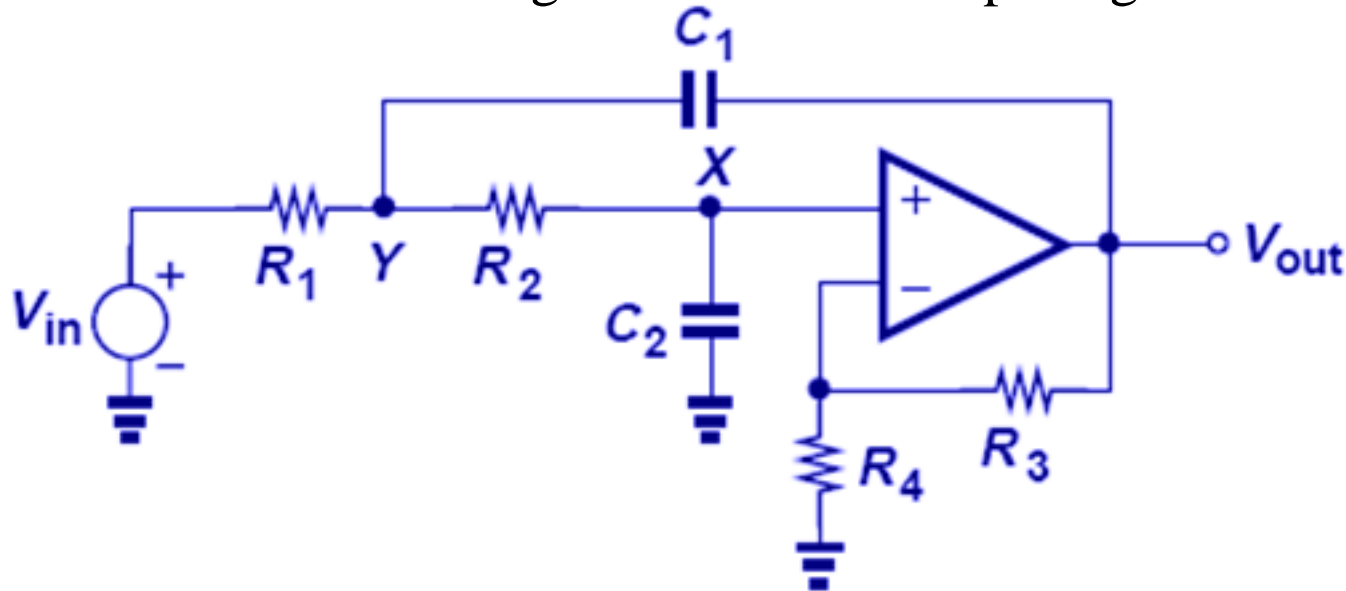
$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

➤ **Filtros Sallen e Key (Filtros SK).** Exemplo de um filtro passa-baixa de segunda ordem.



# Filtros

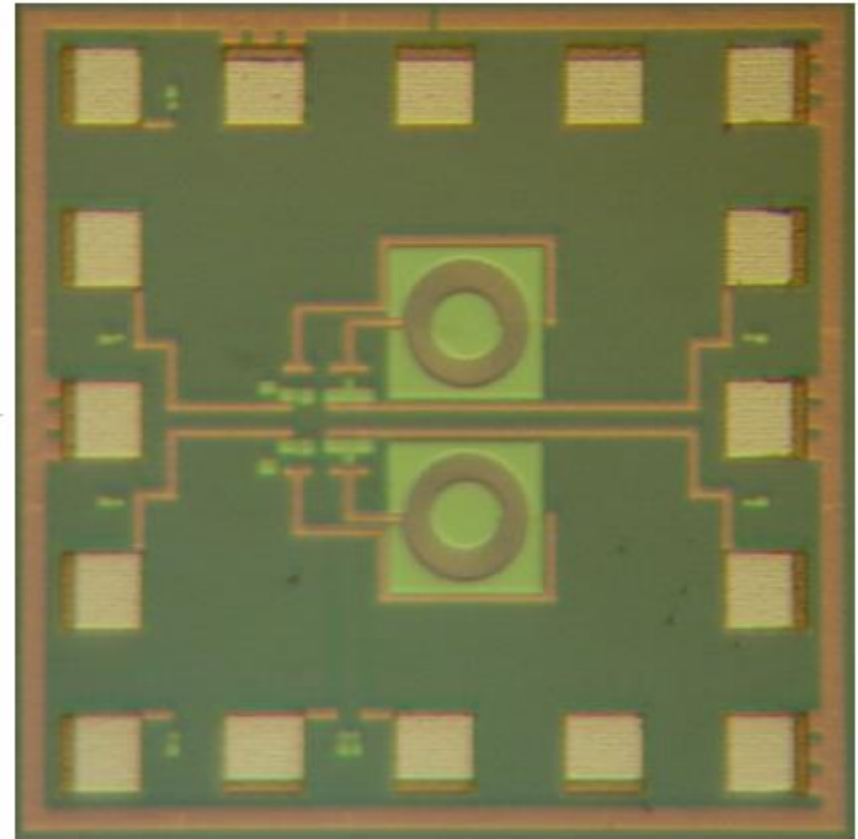
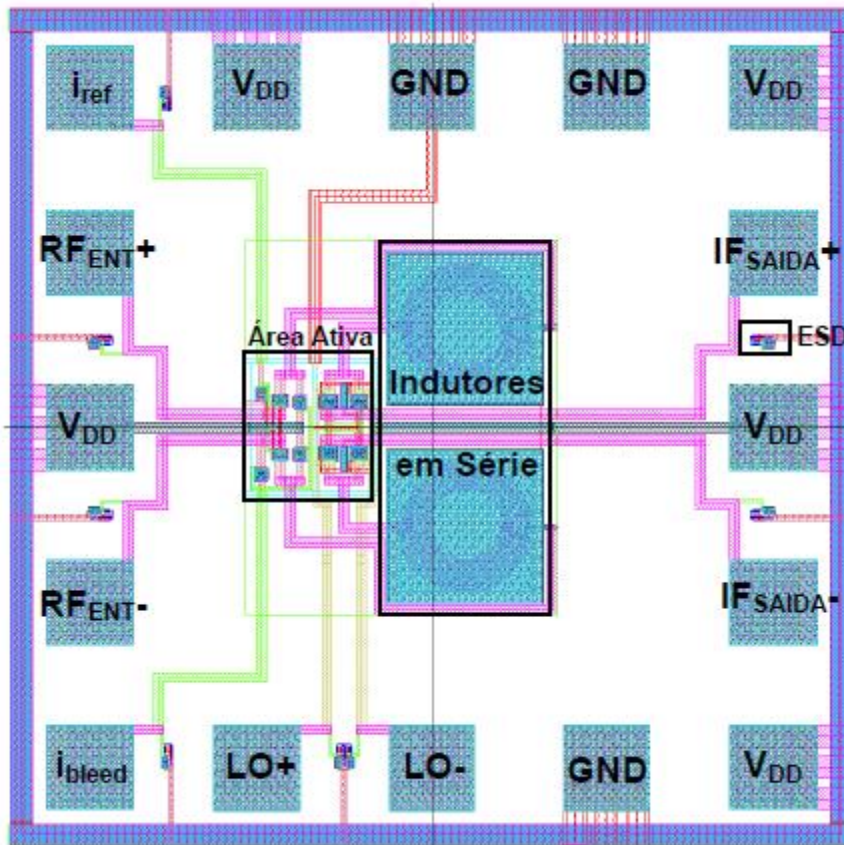
Implementação de Filtros Ativos  
Filtro SK com ganho na banda de passagem



$$\frac{V_{out}}{V_{in}}(s) = \frac{1 + \frac{R_3}{R_4}}{R_1 R_2 C_1 C_2 s^2 + \left( R_1 C_2 + R_2 C_2 - R_1 \frac{R_3}{R_4} C_1 \right) s + 1}$$

# Filtros

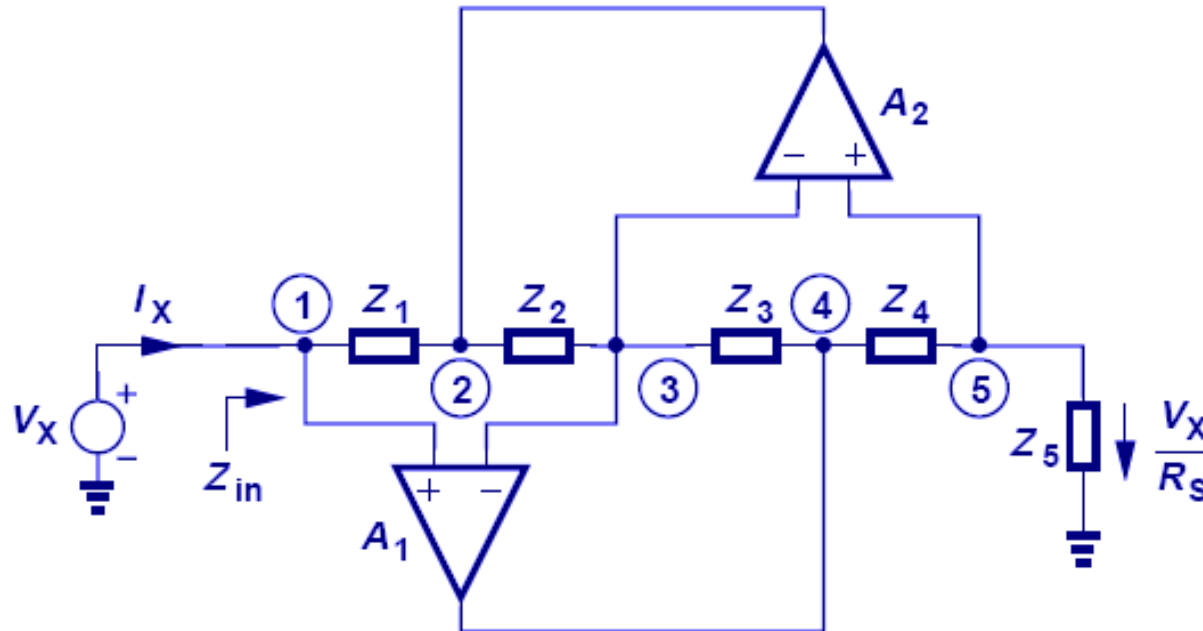
## Indutores



Indutores microfabricados – ocupam grande área do *CI*

# Filtros

## Indutores simulados (emulados)

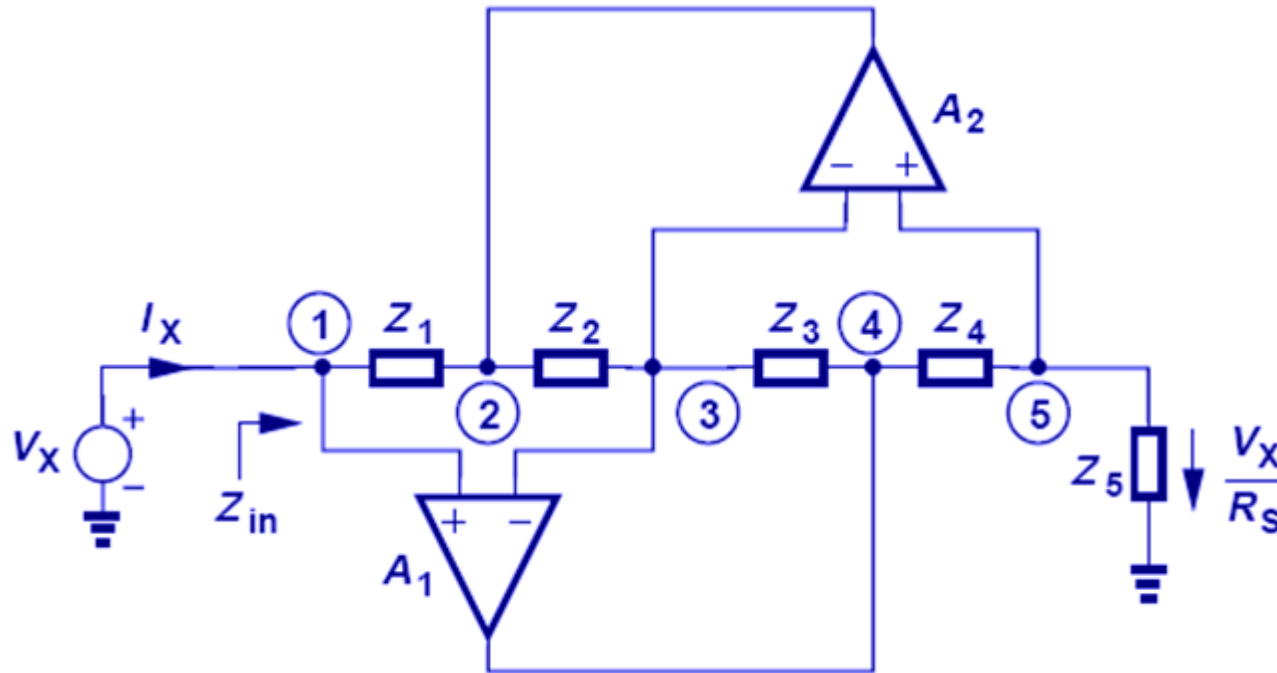


$$Z_{in} = \frac{Z_1 Z_3}{Z_2 Z_4} Z_5$$

- É possível emular o comportamento de um indutor usando circuitos ativos com realimentação e fazendo a escolha de componentes passivos específicos.

# Filtros

Indutores simulados (emulados)



$$Z_1 = Z_3 = Z_4 = R_Y$$

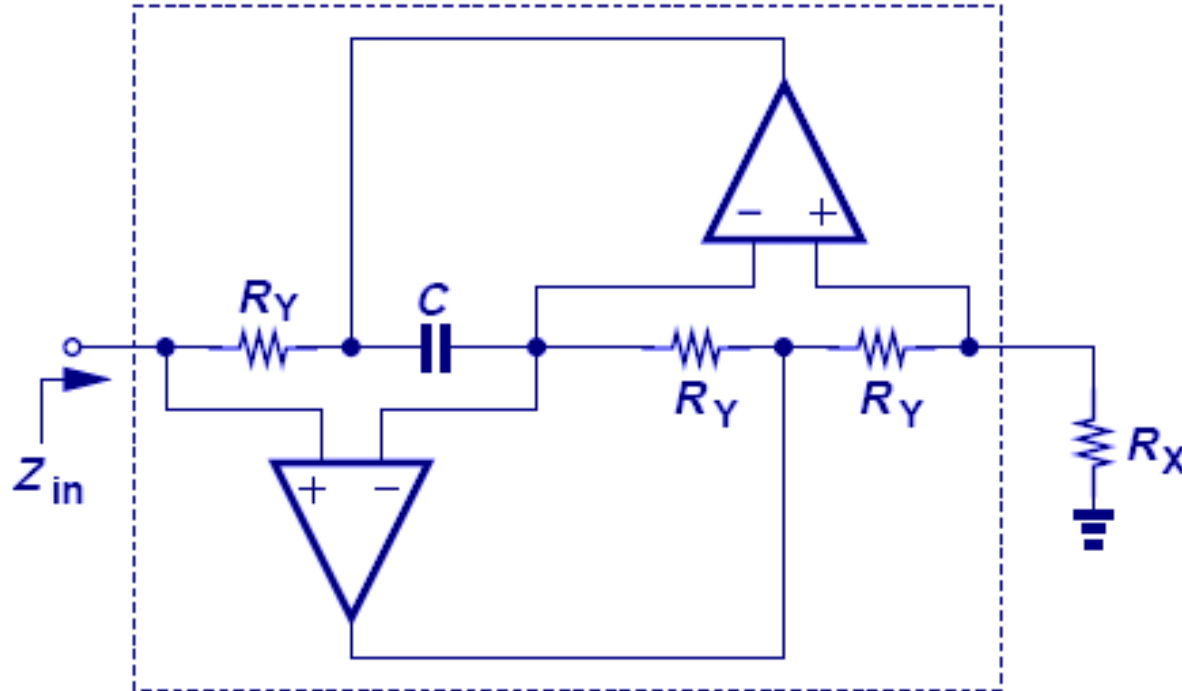
$$Z_5 = R_X$$

$$Z_2 = \frac{1}{C_S}$$

$$Z_{in} = R_X R_Y C_S$$

# Filtros

## Indutores simulados (emulados)

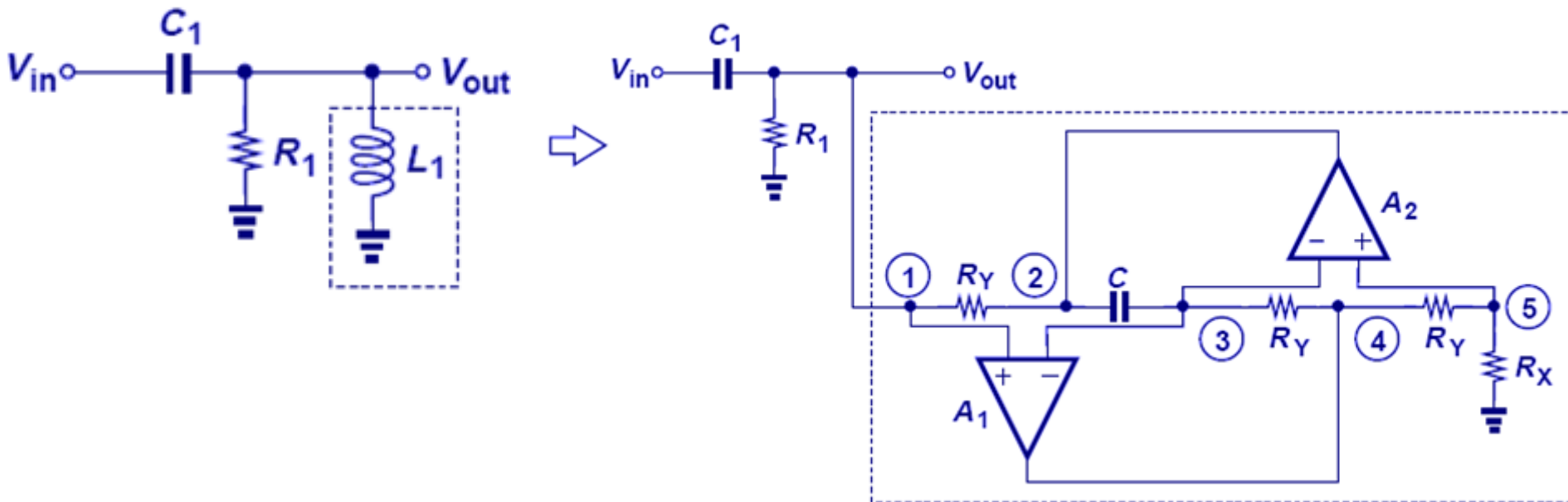


$$Z_{in} = R_X R_Y C S$$

- Escolhendo corretamente as impedâncias de  $Z_1$  a  $Z_4$ ,  $Z_{in}$  passar ser uma impedância que aumenta com o aumento da frequência, simulando um efeito indutivo!

# Filtros

Filtro passa alta com indutor simulado (emulado!)



➤ Função de transferência de filtro passa alta usando o indutor emulado na saída.

# Filtros

Sugestão de Estudo:

- Sedra & Smith 5ed.

Cap. 12, item 12.3

item 12.4

itens 12.5.1, 12.5.2, 12.5.3, 12.5.4, 12.5.5

item 12.6.1

-Razavi. 2ed.

Cap. 14, item 14.3,

itens 14.4.1, 14.4.3,

item 14.5

Exercícios correspondentes.